Le Sirs-Sols du périmètre irrigué de Cébala (Basse vallée de la Mejerda, Tunisie)

Erik Braudeau, Ahmed Loukil, Chafik Zidi, Chedly Derouiche, Mohamed Niang, Mohamed Hachicha, Hatem Belouchette, David Decluseau, Amor Mtimet

▶ **To cite this version:**

Erik Braudeau, Ahmed Loukil, Chafik Zidi, Chedly Derouiche, Mohamed Niang, et al.. Le Sirs-Sols du périmètre irrigué de Cébala (Basse vallée de la Mejerda, Tunisie). Patrice Garin, Pierre-Yves Le Gal, Thierry Ruf. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la gestion des périmètres irrigués collectifs, 2001, Montpellier, France. Cirad - Cemagref -IRD, pp.225-245. <cirad-00188369>

HAL Id: cirad-00188369

http://hal.cirad.fr/cirad-00188369

Submitted on 16 Nov 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

P. Garin, P.Y. Le Gal, Th. Ruf (éditeurs scientifiques), 2002. La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du XXIe siècle, enjeux, problèmes, démarches. Actes de l'atelier, 22-23 janvier 2001, Montpellier, France. Pcsi, Cemagref, Cirad, Ird, Montpellier France, Colloques, 280 p.

Le Sirs-Sols du périmètre irrigué de Cébala (Basse vallée de la Mejerda, Tunisie)

Un système d'information pédologique spécialisé pour la modélisation agronomique

Erik BRAUDEAU*, Ahmed LOUKIL**, Chafik ZIDI**, Chedly DEROUICHE**, Mohamed Niang***, Mohamed HACHICHA****, Hatem BELOUCHETTE****, David DECLUSEAU* et Amor MTIMET**.

*Ird, Iam, 3191 route de Mende, BP 5056, 34033 Montpellier Cedex 1
**Direction des Sols, ministère de l'agriculture, Tunis
***Led, Jussieu Paris VII
****Inrgref, Tunis, Tunisie

Résumé — Le terme Sirs-sols (système d'information à référence spatiale des sols) a été donné à ce Sig pour en rappeler la spécificité : celle de reposer sur une cartographie et une caractérisation pédologiques satisfaisant aux règles de l'approche systémique et la théorie du Système général. Cette spécificité confère au Sig une organisation des informations cartographiques du milieu naturel en niveaux d'organisation emboîtés (unités de relief, de modelé, de sols) en correspondance avec les différents niveaux de gestion également hiérarchisés du milieu administré, le système hydro-agricole. Cela lui donne la possibilité d'être utilisé comme support d'informations idéal pour la modélisation agronomique des unités de sol de même que, aux échelles de gestion supérieurs (l'exploitation, le périmètre irrigué, la zone hydro-agricole) pour la simulation ou prévision de la production agricole, de la consommation d'eau etc. On a fait état à cette occasion du problème de la caractérisation du sol pour la modélisation agronomique et partant, de la nécessité de repositionner la physique du sol dans un contexte systémique. Cela pour 1) tenir compte de l'organisation interne hiérarchisée de l'horizon de sol, (pédostructure, agrégats, plasma argileux) et 2) quantifier certaines notions de physique du sol, empiriques à l'échelle agronomique (capacité au champ, point de flétrissement) mais expliquées aux niveaux internes de la pédostructure par les processus d'interaction eau-sol.

Abstract — The soil-SRIS for the irrigated area of Cébala. The term soil-SRIS (Spatially referenced information system) was given to this GIS to remind us of its specificity : it is based on pedological characterisation and mapping that satisfies the rules of the systems approach and particularly the General System theory. Because of this, the cartographic information about the natural environment is organised within the GIS in hierarchical arrangements of interlocking units (relief, landforms and soils units). These units correspond to the various levels of management of the hydro-agricultural system, which is also hierarchical. It can therefore be used as an information support for *agronomic modelling* of soil units and also, at higher levels of management (exploitation of the irrigated area, hydro-agricultural area), for the *predictive simulation* of agricultural production, water use, etc Thus, we mention the challenges of soil characterisation for agronomical modelling, and explain the need to use the Général System approach to 1) take into account the hierarchical internal organisation of the soil horizon (pedostructure, aggregates, clay matrix) and 2) to explain and quantify the empirical parameters used by the agronomist (field capacity, wilting point) based on processes of soil-water interactions inside the pedostructure.

Introduction

Devant la volonté actuelle des pays à mettre en place des systèmes aménagés durables, visant à une production optimisée, une amélioration des conditions d'exploitation, une préservation du système, le Sig ne peut plus être seulement une simple cartothèque qui rassemble les documents cartographiques existant sur une zone et présentant le milieu (infrastructure, organisation sociale et administrative, sols, peuplements, bâtis etc.), ses points de contrôle et de suivi. Le Sig doit aussi être un support d'informations fiables pour la modélisation du fonctionnement du système aménagé et sa simulation dans le temps, afin de pouvoir répondre aux grandes questions stratégiques que se pose le pays en matière d'aménagement du territoire et d'impact de ces aménagements dans le long terme.

L'un des principaux soucis de la Tunisie en matière d'aménagements hydro-agricoles est la gestion de l'eau d'irrigation qui doit tenir compte de plusieurs contraintes fortes : des ressources en eau limitées, une demande en eau croissante, la nécessité d'un recours aux ressources marginales comme les eaux usées traitées et les eaux saumâtres. Pour gérer l'allocation de l'eau aux différents niveaux de gestion : Commissariat régional au développement agricole (Crda), périmètres irrigués, Groupements d'intérêt collectif (Gic)…, mais aussi pour valoriser l'eau à la parcelle, en fonction du climat, en fonction des sols, il est nécessaire de pouvoir faire des estimations de la demande en eau, des prévisions de productions de toute sorte. C'est ce que l'on fait au niveau de la parcelle par l'intermédiaire de modèles biophysiques comme CropSyst (Stockle et Donatelli, 1997) ou Stics (Brisson *et al.,* 1998), capables de simuler une production agricole en prenant en compte les paramètres du milieu physique (sols, climat) et du système de culture.

Un Sig contribuera avantageusement à cette modélisation s'il possède les informations utiles concernant le milieu physique et en particulier le sol : la délimitation des unités de sol et les caractéristiques physiques de leur fonctionnement hydrostructural en tant que réserve d'eau et milieu de croissance et d'alimentation pour la plante. Or, pour l'obtention de ces informations pédologiques adaptées aux besoins de la modélisation quantitative, se pose toujours à l'heure actuelle le problème conceptuel de la délimitation des unités de sol et de la caractérisation de leurs propriétés physiques.

C'est dans cette problématique que nous pensons important de présenter la notion de Sirs-sols, système d'information à référence spatiale sur les sols, notion qui recouvre un certain nombre de réflexions sur la nécessité d'adopter l'approche systémique et le modèle du système général en particulier (Le Moigne, 1994), pour structurer le Sig en systèmes d'organisations emboîtés ; ce qui concerne autant le milieu administré que le milieu naturel, de la couverture pédologique jusqu'aux micro-organisations du sol (agrégats primaires, plasma argileux). Il s'ensuit une nouvelle conception de la caractérisation physique du sol pour obtenir les paramètres pertinents du sol entrant dans les modèles agronomiques.

Ces réflexions ont pris forme au cours de la réalisation du Sirs des sols du périmètre irrigué de Cébala dans la Basse Vallée de la Mejerda, dans le cadre du programme de Construction d'un Sirs sur les Sols Irrigués de Tunisie (Sirssit), mené par la direction des sols en collaboration avec l'Ird.

Présentation du projet

Cadre

Le programme Sirssit est inscrit depuis 1997 dans le cadre « suivi des périmètres irrigués » à la direction des sols. Parmi les sites hydro-agricoles envisagés pour commencer cette activité nouvelle en recherche et développement, celui de la basse vallée de la Mejerda (Bvm) a été retenu à cause de la priorité donnée à cette région par le Serst et l'Iresa concernant les actions de coopération avec l'Ird (réunion de concertation du 4 mars 1998).

Sirssit est donc devenu Sirssit-Bvm (1998-2000) et a été l'occasion pour la direction des sols d'engager plusieurs travaux de mise au point méthodologique :
- l'installation et la mise en route d'un laboratoire de rétractométrie pour la caractérisation hydrostructurale du sol ;
- la formalisation des données rétractométriques pour être adaptée à la cartographie pédologique et la modélisation agronomique d'un milieu aménagé hydro-agricole ;
- la conception du Sirs-Sols.

Objectif

L'objectif est de répondre de manière cohérente au problème de l'utilisation et de la pertinence des données pédologiques dans la problématique de la gestion de l'eau et de l'environnement d'un système irrigué. Pour cela, il s'agit d'établir un Sirs des données pédologiques permettant la modélisation agronomique des parcelles et une simulation des termes de production et de demande en eau à plusieurs niveaux de gestion du système.

Site d'étude

Le site d'étude choisi est le périmètre de Cébala, un périmètre irrigué par les eaux usées traitées venant de Tunis. Il est situé dans la basse vallée proprement dite, côté est de la route Tunis-Bizerte, entre Cébala, Borj-Touil au sud et l'embranchement vers Kalaat Landalous au nord, à hauteur de l'ancien pont de Bizerte au-dessus de la Mejerda (figure 1). Ce périmètre de 3 180 ha, datant de 1988, fait partie des périmètres publics nouvellement aménagés et gagnés sur des terres salées et assainies comme ceux de Kalaat Landalous et Henchir Tobias dans la même zone à proximité de la mer. Le périmètre de Cébala est cependant le seul à être aménagé pour l'irrigation en eaux usées traitées.

Problématique et choix méthodologiques

Position de la pédologie dans l'élaboration d'un Sig

Aujourd'hui les moyens informatiques permettent de présenter un milieu organisé à toutes les échelles de perception, ce qui fait que le problème d'appréhension, de caractérisation et de présentation du milieu sol revient à l'actualité et se pose avec plus d'acuité encore. Ce problème se résume en deux questions principales auxquelles la cartographie pédologique a toujours été confrontée :
– la délimitation des unités cartographiques à une échelle donnée ; c'est la toute première opération de modélisation du milieu, l'opération de « systémographie » en modélisation systémique (Le Moigne, 1994) ;
– la caractérisation typologique et physique de ces unités aux différentes échelles, en sachant pour qui et pourquoi cette caractérisation. Pour cela, il est nécessaire de faire la distinction entre une formulation empirique des propriétés de l'objet pour la problématique posée par l'utilisateur (ici l'agronome) et une formulation mécaniste et théorique qui ne peut se faire qu'au niveau d'échelle du processus à l'intérieur de l'objet dans ses niveaux d'organisation internes (horizon de sol, agrégats, plasma, particules).

Pour traiter de ces deux questions à la fois, la reconnaissance et prise en compte effective des niveaux d'organisation, aussi bien internes qu'externes au sol, est nécessaire ; et l'approche systémique s'impose d'elle-même. La première question a largement été débattue par les géographes depuis les années 80 autour des notions de géosystème et de niveaux d'organisation d'échelle spatiale croissante (Barrué-Pastor et Muxart, 1992). Les géographes cependant n'allaient pas jusqu'à la définition des unités de sol et encore moins jusqu'à l'échelle des processus à l'intérieur du sol. A cause de cela peut-être, mais surtout, à cause de la diversité des approches et du choix des critères d'homogénéité, la délimitation des unités d'un niveau donné restait un problème de systémographie non résolu (Muxart *et al.,* 1992) : sous le regard de quelle discipline exprimer les différents niveaux du système complexe ? C'est Brabant (1992) qui, exprimant l'expérience de nombre de pédologues de terrain, a clairement donné les principes d'un découpage fonctionnel du milieu naturel en niveaux emboîtés : unité naturelle de terrain, unité de modelé, unités de sol, horizon. C'est cette démarche que nous avons adoptée qui est en parfait accord avec le modèle du système général (Sg) de J.L. Le Moigne (1994) comme nous le verrons plus loin. Par contre, la deuxième question, à savoir la caractérisation des unités de sol, n'a jamais été traitée dans cette même vision systémique et a, de ce fait, très peu évolué contrairement à la cartographie; elle est en tout cas en complet déphasage avec les notions qui s'y sont développées : échelles d'observation, niveaux hiérarchisés, transfert d'échelle.

En fait, ce qui va nous permettre de traiter du problème de la caractérisation du sol pour le Sirs-Sols, en phase avec la cartographie, est l'application de la théorie du Sg au système que forme l'homme et le sol ; sol que l'homme exploite et entreprend de connaître pour mieux le contrôler et le gérer.

Le système homme–sol isomorphe du système général

« *La théorie du système général est la théorie de la modélisation des objets quels qu'ils soient (naturels, artificiels , complexes) à l'aide de cet objet artificiel peu à peu façonné par la pensée humaine que L. von Bertalanffy proposera d'appeler le système général* (Le Moigne, 1994, p . 60). *… La théorie du système général est – et n'est que – l'exposé d'une théorie de la modélisation : l'exposé des propriétés cohérentes de l'objet système général, outil de modélisation.* »

Le système général, défini exhaustivement comme un *objet actif, stable, évoluant, dans un environnement, et par rapport à une finalité*, a été décrit méthodiquement par Le Moigne (1994) dans un référentiel à trois axes, universel au sens de l'analyse systémique : fonctionnel, ontologique et génétique (figure 1).

Cette étude conduit Le Moigne à une formalisation du système général schématisé à la figure 2.

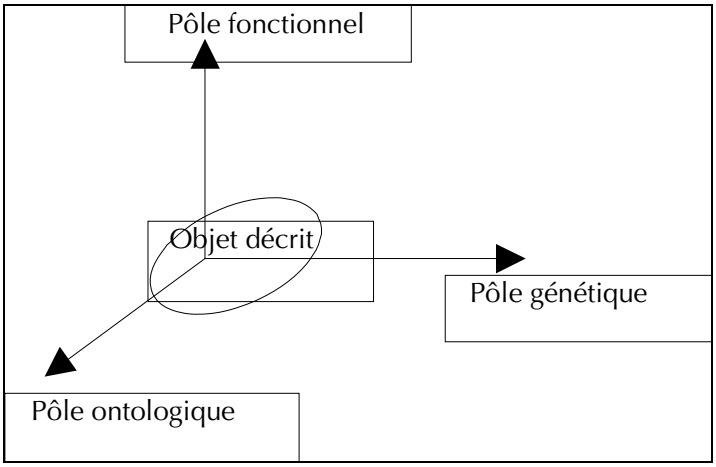


Figure 1. Description de l'objet modélisé dans un référentiel universel à trois axes.

Le système général est composé, sous sa forme la plus évoluée, d'un système opérant (So), géré, connu, contrôlé par un système de pilotage (Sp), par l'intermédiaire d'un système d'information (Si).

Comment ensuite établir une correspondance entre un *objet* identifié, par exemple le périmètre irrigué de Cébala, et le système général ? La réponse est « relativement simple : la représentation que construit l'observateur sera à la fois :
- isomorphe du système général : le modèle aura un Sp, un Si et un So ;
- homomorphe de l'objet à représenter.

La première condition sera vérifiée si « les propriétés dont on dote le modèle sont bien en correspondance bijective avec celles du système général : un objet qui, doté de finalités, fonctionne, se structure et évolue dans un environnement » (Le Moigne, 1994). La seconde condition stipule que l'on peut faire correspondre à chacun des traits dont on dote le modèle au moins un trait perçu ou anticipé de l'objet considéré.

Concernant le milieu aménagé, on peut constater que l'idée ou la représentation (modélisation) que l'on peut se faire d'un système de gestion à quelque niveau d'organisation de ce milieu que ce soit, remplit facilement ces deux conditions (figure 3) : du niveau de la parcelle avec l'agriculteur qui la gère, à la grande zone hydro-agricole sous la responsabilité du Crda, en passant par le groupement d'agriculteurs autour d'une borne ou le périmètre irrigué avec son directeur.

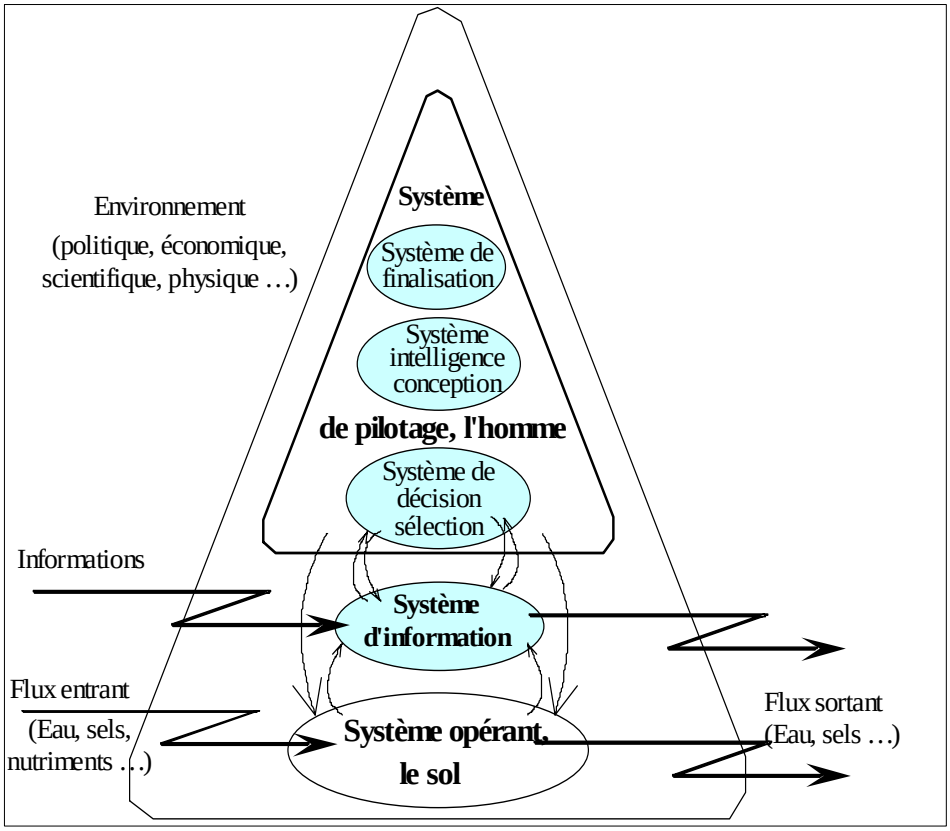


Figure 2. Le système général homme-sol**.**

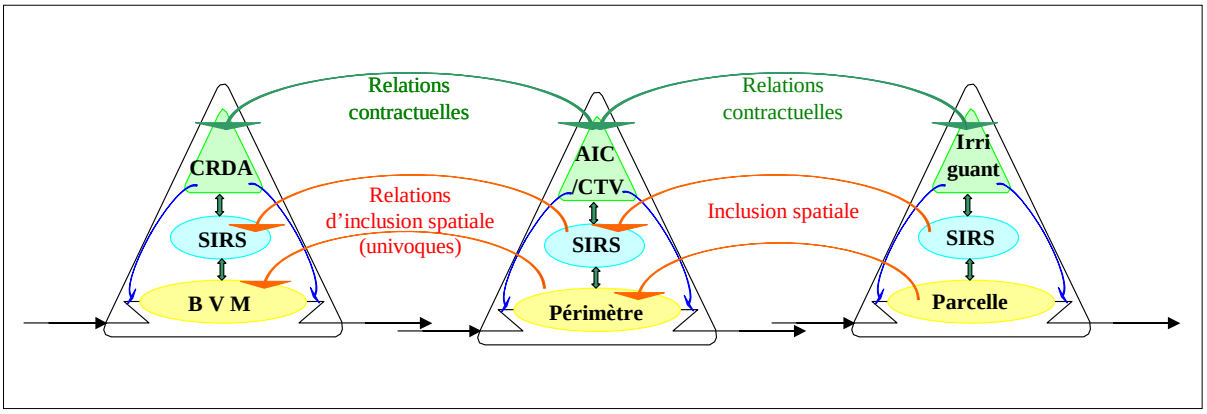


Figure 3. Les systèmes hiérarchisés de gestion de l'eau et du sol dans la Bvm.

Ainsi, l'homme gestionnaire à un niveau donné, est en relation avec le sol par l'intermédiaire de son propre système de représentation, le Si, du milieu aménagé, le So, lequel est un milieu physique délimité dans l'espace et lui-même subdivisé en sous-systèmes opérants. Grâce à la mise en homomorphie de chaque niveau de gestion avec le système général (figure 2), il est possible alors d'ériger un système d'information commun à tous les gestionnaires aux différentes échelles (agriculteur, chef du périmètre, etc.) tout simplement en géoréférençant chaque Si de chaque niveau. Chaque Si devient alors un Sirs (figure 3) ; et le fait que les différents acteurs soient des gestionnaires de systèmes opérants délimités et inclus les uns dans les autres entraîne que leurs Sirs soient également en rapport d'inclusion strict d'un niveau de gestion à l'autre, supérieur ou inférieur. Le système de représentation commun a en fait toutes les caractéristiques d'un Sig qui, au lieu de présenter les informations sans distinction de niveaux d'échelle, est organisé en Sirs des différents niveaux de gestion inclus les uns dans les autres. La

conclusion à laquelle la modélisation selon le Sg conduit est le résultat important suivant : les Si à référence spatiale des différents gestionnaires d'un milieu spatial administré sont automatiquement compatibles entre eux (figure 3). Restent à considérer maintenant les principes d'organisation du milieu naturel puis l'adéquation entre les deux milieux (figure 4).

Considérant le milieu dit naturel, toujours en se référant au modèle du Sg, il y aura compatibilité des Si des différents niveaux d'organisation du milieu naturel si celui-ci est vu par un même regard, celui du scientifique en science du sol, aux différentes échelles emboîtées (figure 4) qui émergent de manière évidente comme l'a exprimé Brabant (1992) et bien d'autres naturalistes pédologues, du paysage à l'unité homogène de sol, elle-même composée de couches homogènes appelées horizons, composés eux aussi d'agrégats. En reprenant donc, à la figure 4, la systémographie proposée par Brabant (1992) mais, comme on le verra plus loin, en la continuant à des niveaux d'organisation encore plus fins à l'intérieur de l'horizon de sol, jusqu'aux niveaux des processus physico-chimiques d'interaction eau-sol (figure 18 en annexe) ; et cela en respectant les deux règles énoncées plus haut pour rester en conformité avec le Sg. Le système {pédologue – Sirs – milieu naturel} est bien isomorphe du Sg avec un Sp un Si et un So. Le So (l'unité naturelle de terrain) est lui-même organisé en plusieurs sous-systèmes opérants emboîtés, satisfaisant à la règle d'homomorphie avec les systèmes fonctionnels de la structure du milieu naturel.

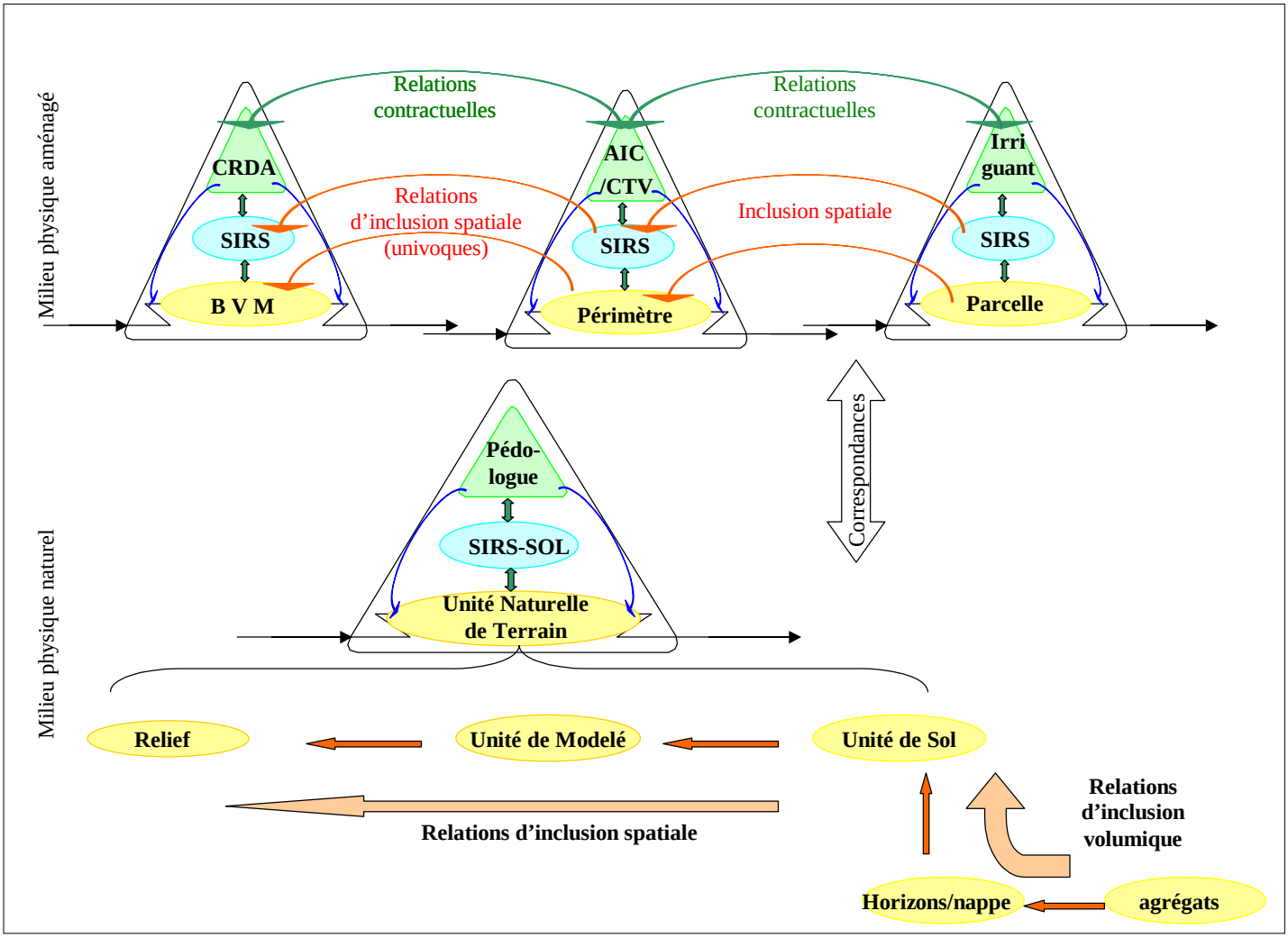


Figure 4. Les deux types de modèles du milieu hydro-agricole isomorphes du système général : les systèmes de gestion ou d'exploitation d'unités spatialisées et les systèmes géomorpho-pédologiques.

Adéquation entre les Si du milieu anthropisé et du milieu naturel

L'adéquation entre les deux milieux, anthropisé et naturel, est un problème depuis longtemps débattu de l'étude d'un objet-système complexe et transdisciplinaire (Muxart *et al.,* 1992). C'est cette même question qui nous intéresse ici mais le référencement au modèle du système général fait que nous limitons notre étude au cas de milieux pédologiques anthropisés, sous une gestion spatialisée en cours et couvrant plusieurs niveaux ; comme peut l'être un milieu hydro-agricole régional, communal... On se trouve alors dans le cas de la figure 4 où les deux milieux se distinguent d'emblée par l'organisation de leur système opérant et par suite de leur Si respectif. On peut ainsi constater les deux points suivants.

La relation transversale (dans le même milieu) d'un système opérant d'un niveau à un autre (et donc aussi d'un Sirs à un autre) est une relation d'inclusion spatiale stricte ; la connaissance des caractéristiques intrinsèques d'un niveau se retrouve au niveau supérieur augmentée de la connaissance de la répartition de ces caractéristiques dans ce niveau.

Le croisement d'informations entre les deux systèmes d'information parallèles, celui du pédologue et celui du gestionnaire (figure 4), se fait en croisant les unités de base des deux systèmes : l'unité de sol pour l'un et la parcelle pour l'autre.

C'est une constatation importante car effectivement, la modélisation agronomique que l'on veut pouvoir effectuer sur la base des informations du Sirs, s'adressera exactement à l'unité issue de ce croisement {unité de sol – parcelle}, unité qu'il serait justifié de dire maintenant « agronomique ». Ensuite, grâce aux Sirs des niveaux de gestion supérieurs, la modélisation des unités agronomiques s'intègre facilement (sommation exhaustive des surfaces) aux niveaux d'échelle supérieurs pour donner les simulations recherchées de production, d'accumulation et d'évolution des unités de gestion géoréférencées à ces échelles de niveau supérieur. La fiabilité des résultats de la simulation repose donc sur la qualité de la modélisation agronomique de l'unité (agronomique) sol-parcelle qui elle-même dépend de la qualité de la modélisation hydrostructurale du module sol (l'unité de sol) et donc de sa délimitation et de sa caractérisation.

Après cette analyse, on discerne mieux les qualités que doit posséder le Sig pour son utilisation comme support d'informations à la modélisation et d'aide à la décision (simulations). Il doit être composé :
– d'un Sirs des niveaux de gestion emboîtés de la zone agricole ;
– d'une cartographie pédologique en niveaux d'organisation naturelle emboîtés ;
– d'une caractérisation physique des unités de sol, en rapport avec les niveaux d'organisation internes et leurs propriétés hydrostructurales.

Choix méthodologiques

Le Sirs des niveaux de gestion du périmètre irrigué de Cébala

Le Sirs du milieu aménagé est le résultat d'un long travail méthodique et classique de rassemblement des documents cartographiques liés à l'aménagement du périmètre et à sa gestion publique par le Crda : plans d'aménagement, parcellaire, zonage, subdivisions administratives, points de contrôle (piézomètres, buses, parcelles enquêtées), photos aériennes, satellites existants etc. Tous ces documents sont ensuite numérisés, vérifiés, géoréférencés pour une concordance précise entre les couches des infrastructures, les photos aériennes et les cartes d'état-major. Chaque thème possède sa table d'identification, de caractérisation et de suivi (état de marche, données d'utilisation, de contrôle ou de mesure) en lien avec le livre de compte du gestionnaire du périmètre qui est ici le « Centre de gestion du périmètre irrigué en Eut de Cébala- Borj-Touil ».

Le Sirs des sols de la zone hydro-agricole de Cébala

Il est généralement admis (Brabant, 1992) que les unités de sol sont incluses dans les unités de modelé, elles-mêmes sous-unités du relief (figure 4). Or, les unités de modelé sont facilement délimitées sur photos aériennes (à 1/20 000 généralement) après un travail d'interprétation que l'on effectue à l'aide de documents géologiques et pédologiques qui existent généralement à 1/50 000 sur la zone. Ces délimitations de modelé apportent déjà beaucoup de renseignements sur le matériau qui constitue le sol

car, du fait de leur position géomorphologique, ces unités possèdent un matériau de même origine (d'apport ou en place sur la roche-mère) et de même nature car ils ont évolué sous un même régime pédohydrique et climatique. Les unités de relief et de modelé spécifient donc le matériau sol sur les deux axes, ontologique et évolutif de la figure 1.

Ce qui peut ensuite amener une délimitation interne de l'unité de modelé en sous-unités de sol est une différenciation sur l'axe fonctionnel, c'est-à-dire une différence dans le comportement interne du sol vu comme processeur vis-à-vis des flux qui le traversent (figure 2), face aux stimuli de l'extérieur (culture, climat...). Or, en général, ce qui induit une différence de comportement est la présence d'une nappe à faible profondeur, ou bien une variation texturale liée à la mise en place hétérogène du matériau, la pratique d'un système de culture particulier ou encore un aménagement particulier (drainage). Dans le cas des sols de Cébala, la délimitation des unités de sol à l'intérieur d'une unité de modelé a été le plus souvent imputable à une variation de la texture et de la salinité. Ce sont ces critères relevés au cours de prospections de terrain et observations à la tarière qui ont servi à la délimitation des unités de sol de l'ancienne carte à 1/20 000 dressée par A. Mori en 1963. Pour sa réactualisation, on a donc procédé comme suit.

Les unités de modelé ont d'abord été redessinées sur l'ancienne carte des unités de sol reconnues par A. Mori (1963), en regroupant les unités de sol dans les unités géomorphologiques auxquelles elles appartiennent. Puis, les contours de ces unités géomorphologiques (ou de modelé) ont été corrigés d'après la mosaïque des photos aériennes de 1988 à 1/20 000 elle-même géoréférencée dans le Sirs. Une fois cette correction faite, les unités de sol identifiées par Mori (1963) et qu'il a différenciées par leur texture et leur salinité à plusieurs niveaux de profondeur, ont été vérifiées et quelques fois corrigées par une prospection sur le terrain. Il en a résulté deux cartes, une carte physiographique et une carte pédologique, dont les unités sont incluses les unes dans les autres, représentant 4 niveaux de structure : unités de relief, de modelé, de sols et d'horizons (niveaux de profondeur) comme indiqué à la figure 4.

Grâce à cet emboîtement, les unités de sol ainsi délimitées peuvent être considérées comme unités homogènes pour la modélisation agronomique. De plus, elles sont correctement caractérisées dans la légende selon les trois axes de description, d'une part par leur dénomination dans la classification tunisienne et d'autre part, par leur texture et salinité à plusieurs niveaux de profondeur. En effet, la classification des sols utilisée en Tunisie est une adaptation de la classification française (Cpcs, 1966), dite pédogénétique : les sols sont nommés et classés d'après leur degré d'évolution, leur origine, les facteurs de la pédogenèse et le processus pédogénétique en cours. La nature du matériau, sa mise en place sont données par la carte physiographique.

Cependant, la description sur l'axe fonctionnel par mention de la texture et de la salinité semble très succincte pour une modélisation quantitative de l'unité de sol dans les modèles agronomiques. Cette remarque pose le problème de l'utilisation quantitative des cartes pédologiques, avec leur contenu d'informations, pour la modélisation du système sol-plante.

Caractérisation physique des unités de sol pour la modélisation agronomique

Actuellement, les modèles comme CropSyst utilisent des fonctions *pedotransfer* pour fournir les caractéristiques physiques du sol dont ils ont besoin pour tourner au minimum : la densité apparente, la capacité au champ, le point de flétrissement, la courbe de potentiel de l'eau et la conductivité hydraulique. Ces fonctions *pedotransfer* sont des équations empiriques, souvent polynomiales, donnant une valeur statistique de la propriété du sol en fonction de la texture (Tietje et Tapkenhinrichs, 1993). Par conséquent, une carte pédologique qui présente une délimitation fiable des unités de sol homogènes et qui renseigne dans sa légende sur la texture en surface et en profondeur, peut être considérée comme le minimum atteint pour permettre une modélisation agronomique des sols telle qu'on la conçoit actuellement en agriculture de précision (Bouma *et al.*, 1999).

Cependant, il subsiste un problème fondamental concernant la caractérisation physique du sol en général : à savoir que le milieu sol, que l'on prend comme milieu hypothétique de travail pour établir les équations du fonctionnement hydrique du sol, est un milieu poreux rigide où aucune place n'est donnée aux processus physico-chimiques d'interaction entre l'eau et les particules et agrégats du sol, lesquels dépendent entièrement de la nature minéralogique du plasma argileux. Ces processus hydrostructuraux que l'on néglige, sont pourtant à l'origine des propriétés physiques du sol comme la réserve en eau, la

capacité au champ et même la courbe de potentiel de l'eau. De plus, certains phénomènes comme les fentes de retrait, les propriétés mécaniques du sol associées aux états hydrostructuraux (friabilité, cohésion…), dépendent directement de la variation volumique des organisations internes du sol. Ces phénomènes, importants à considérer dans la gestion agricole (travail du sol, irrigation en fonction de l'état hydrique du sol) ne peuvent donc pas être modélisés avec une telle conception du sol, c'est-à-dire sans considération de l'organisation interne hiérarchisée variable avec l'eau.

Cela semble rédhibitoire car, pour être en mesure de modéliser ces phénomènes hydrostructuraux, il est nécessaire de disposer d'au moins un indicateur 1°) du comportement physique minéralogique du matériau et 2°) de son organisation fonctionnelle interne ; ce que la texture seule ne peut donner. Par contre, la courbe de retrait (Cr), qui représente le volume massique d'un échantillon de sol soumis à évaporation en fonction de la teneur en eau, peut remplir ce rôle car elle contient en elle-même ces deux types d'information. Ces informations ont été définies et formalisées de manière précise et pertinente à partir d'un modèle d'interprétation de la courbe de retrait mesurée en continu (Braudeau, 1988b ; 1995) qui prend en compte l'organisation interne de l'horizon de sol appelée pédostructure (figure 19 en annexe) et la variation volumique de cette organisation.

La mesure en continu de la Cr est une condition nécessaire pour repérer précisément les points de transition de phase de retrait sur la courbe de retrait (Braudeau *et al.*, 1999) ; ces points constituant les paramètres caractéristiques du comportement hydrostructural du sol. On doit pour cela disposer d'un appareillage spécifique appelé rétractomètre (figure 18 en annexe) qui est malheureusement peu courant mais dont la direction des sols a fait l'acquisition en 1997 pour le projet Sirssit. L'annexe fournit quelques indications sur la méthodologie adoptée pour caractériser le sol et fournir de manière standard les paramètres pertinents nécessaires à une modélisation agronomique du sol. Le détail de la théorie se trouve dans un numéro spécial du Bulletin des Sols (Direction des sols et Ird, 2001). On démontre que l'espace de description des propriétés hydrostructurales de la pédostructure (et ses niveaux internes) est de dimension 11 ; ce qui veut dire que 11 paramètres indépendants sont nécessaires pour décrire la totalité de ces propriétés. Ces paramètres sont choisis parmi les coordonnées des points de transition obtenues sans difficulté à partir de la courbe de retrait mesurée (Braudeau *et al.*, 1999).

Comme il n'était pas envisageable d'introduire ces 11 paramètres dans la légende de la carte pédologique on a cherché à ne retenir que ceux nécessaires au modèle agronomique. A ce sujet, Braudeau et Donatelli (2001) ont montré que les paramètres de base à retenir pour modéliser la variation hydrostructurale du sol étaient les suivants : le volume apparent V (sec ou à la capacité au champ), la capacité au champ W_{CC}, le point de flétrissement W_{PF}, K_{bs} (pente de la phase de retrait dite « normale ») et la valeur du *COLE* (coefficient of linear extensibility, indicateur standard des propriétés de gonflement-retrait du sol) facilement obtenue en laboratoire par une méthode normalisée (McKenzie *et al.*,1994). Avec ces paramètres, on modélise la partie de la courbe de retrait dont on a besoin, entre la capacité au champ (début de l'ouverture de la porosité verticale : fissures, fentes) et l'état sec. Tous ces paramètres sont évidemment fournis de manière précise et cohérente par la Cr si elle est mesurée au rétractomètre. A défaut, ils sont évalués soit séparément par des tests standards (courbe des pF pour la capacité au champ et le point de flétrissement), soit par des fonctions *pedotransfer* à partir de la texture ou sur la base éventuellement d'autres renseignements comme la capacité d'échange cationique (Cec) ou la nature du matériau argileux.

Dans le cas du Sirs-Sols de Cébala, s'agissant d'une méthodologie nouvelle à formaliser et mettre en œuvre pour le projet, l'analyse rétractométrique n'a pas porté sur l'ensemble des sols du périmètre mais seulement sur les sols des segments d'enquête du Crda (groupement de parcelles de 20 ha environ, figure 10). A partir de là, deux travaux de recherche ont été mis en route :
– une étude sur les paramètres pédohydriques mesurés, les corrélations avec la texture, le pF 4.2 (W_{PF}) et le pF 2.8 (W_{CC}), le type de sol ;
– un suivi agronomique sur deux sols différents des segments analysés : 4 systèmes de culture mis en place par l'agriculteur ont été suivis pendant 2 cycles de manière à tester CropSyst muni des paramètres locaux, aussi bien en termes de croissance, développement, production agronomique qu'en termes d'états hydriques et salins du sol (Belhouchette *et al.*, 2001).

Résultats

Le Sirs-Sols

Les résultats sont présentés sous forme de quelques exemples de sorties graphiques. L'ensemble des données du Sirs-Sols sont consignées dans un Cd-Rom qui accompagne le Bulletin des Sols (Direction des sols, Ird, 2001). Un catalogue des données, dont le sommaire est donné au tableau I, décrit chaque thème introduit.

Tableau I. Liste des thèmes introduits dans le Sirs-Sols.

Bornes d'irrigation (p. 23)	Nappe (Profondeur) (p. 31)	Pistes (p. 39)	Soupapes (p. 47)
Canal eaux usées (p. 24)	Nappe (Salinité) (p. 32)	Points pédologiques (p. 40)	Station d'épuration (p. 48)
Chambres de vannes (p. 25)	Occupation du Sol (p. 33)	Relief (p. 41)	Station de pompage (p. 49)
Côte (p. 26)	Parcellaire (p. 34)	Réservoir (p. 42)	Unité de Cébala / Borj Touil (p. 50)
Courbes de niveaux (p. 27)	Pédologie (p. 35)	Routes (p. 43)	Ventouses (p. 51)
Drainage (p. 28)	Périmètre (p. 36)	Secteurs d'irrigation (p. 44)	Vidanges (p. 52)
Géomorphologie (p. 29)	Photos aériennes (p. 37)	Secteurs parcellaires (p. 45)	Zones drainées (p. 53)
Irrigation (p. 30)	Piézomètres (p. 38)	Segments Crda (p. 46)	Zones d'irrigation (p. 54)

Echelle régionale

Organisations de gestion régionale

La figure 5 présente la délimitation du gouvernorat de l'Ariana qui repend en majeure partie la délimitation du « grand périmètre irrigué de la Bvm » en 1953.

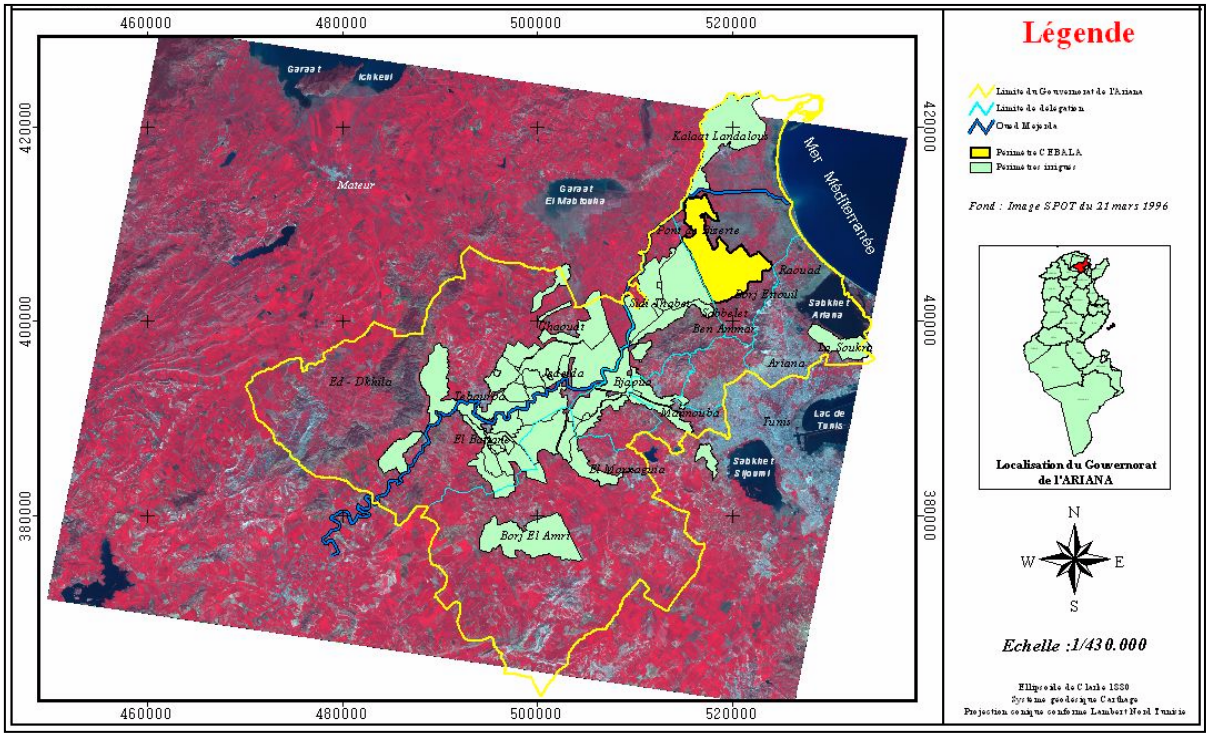


Figure 5. Carte de situation : le périmètre de Cébala (hachuré) parmi les périmètres irrigués (en gris clair) dans le Gouvernorat de l'Ariana (image spot 1995).

La réalisation des périmètres irrigués, à part celui de Kalaat Landalous au nord et celui de Cébala, date des années 70. Ils représentent environ 30 000 ha irrigués par l'eau de la Mejerda par l'intermédiaire de 3 grands canaux et d'un réseau important de conduites à ciel ouvert portées.

Administrativement, ces Ppi anciennement gérés par l'Omvvm (Office de mise en valeur de la vallée de la Mejerda) jusqu'en 1988, sont actuellement sous la dépendance du Crda de l'Ariana qui assure les grands travaux d'entretien, la fourniture et la gestion de l'eau d'irrigation, effectue les enquêtes statistiques, aides et conseils techniques etc. à travers plusieurs délégations qui ont été représentées à la figure 6. Le barrage de El Aroussia à l'entrée du delta de la Bvm, près de Tébourba (fig. 6) est le réservoir à partir duquel l'eau de la Mejerda est répartie en plusieurs grands canaux d'irrigation dont celui qui amène l'eau à ciel ouvert jusqu'au Cap Bon. Le périmètre irrigué de Cébala, zone initialement marécageuse et soumise aux crues de la Mejerda (jusqu'en 1973), n'a été aménagée qu'en 1988 après assainissement et ne fait pas partie du réseau d'irrigation de la Mejerda.

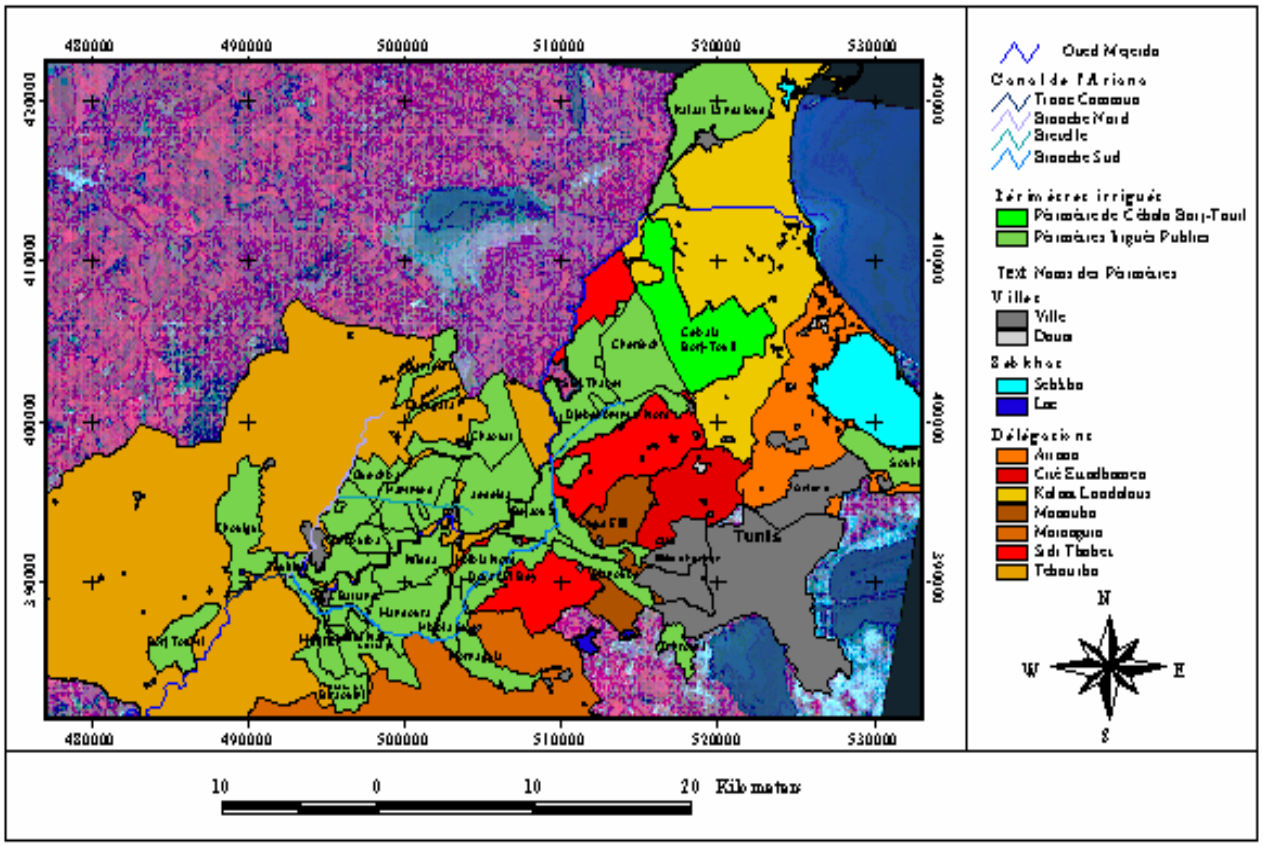


Figure 6. Limites administratives et grands canaux d'irrigation.

Environnement naturel autour du périmètre

La figure 7 présente le périmètre de Cébala à quelques kilomètres de la mer, bordant la route nationale Tunis-Bizerte. C'est une image spot de juillet 1998. On a représenté les grands émissaires dont certains ont été construits bien avant l'installation du périmètre en 1988 pour assainir la zone (sols salés et marécages). On aperçoit au nord du périmètre le nouveau cours dévié de la Mejerda, canalisé jusqu'à la mer après un dernier poste de pompage pour le périmètre de Kalaat Landalous au nord.

Les collines calcaires qui bordent la Bvm au sud, la séparant de la ville de Tunis, sont bien visibles colorées en marron (Djebel Amar). Au nord du périmètre, au croisement de la Mejerda et de la route de Bizerte (ancien pont de Bizerte), on aperçoit en marron clair des collines que longe et traverse la Mejerda qui sont des *lunettes* d'accumulation éolienne situées entre un relief calcaire résiduel.

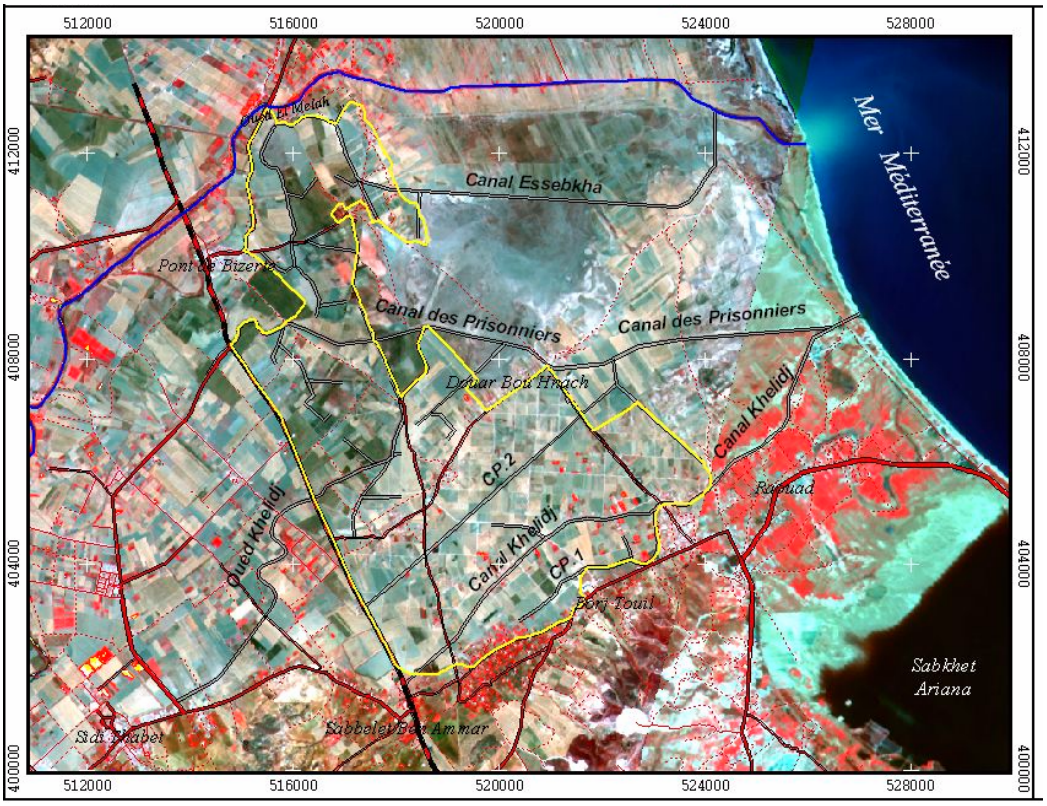


Figure 7. Image spot (mars 1988) du périmètre de Cébala avec ses principaux émissaires.

Echelle du périmètre

Infrastructure hydraulique du périmètre

Les figures 8 et 9 donnent les réseaux complets de drainage et d'irrigation du périmètre. A la figure 9 sont représentés la station d'épuration de Raoued au nord de Tunis, le canal d'amenée des eaux traitées vers la mer et la station de pompage sur ce canal qui refoule l'eau dans un réservoir placé sur la colline calcaire au dessus de Borj-Touil. L'eau arrive donc sous pression dans le périmètre au niveau de chaque borne, elle-même référencée dans le Sirs (figure 11).

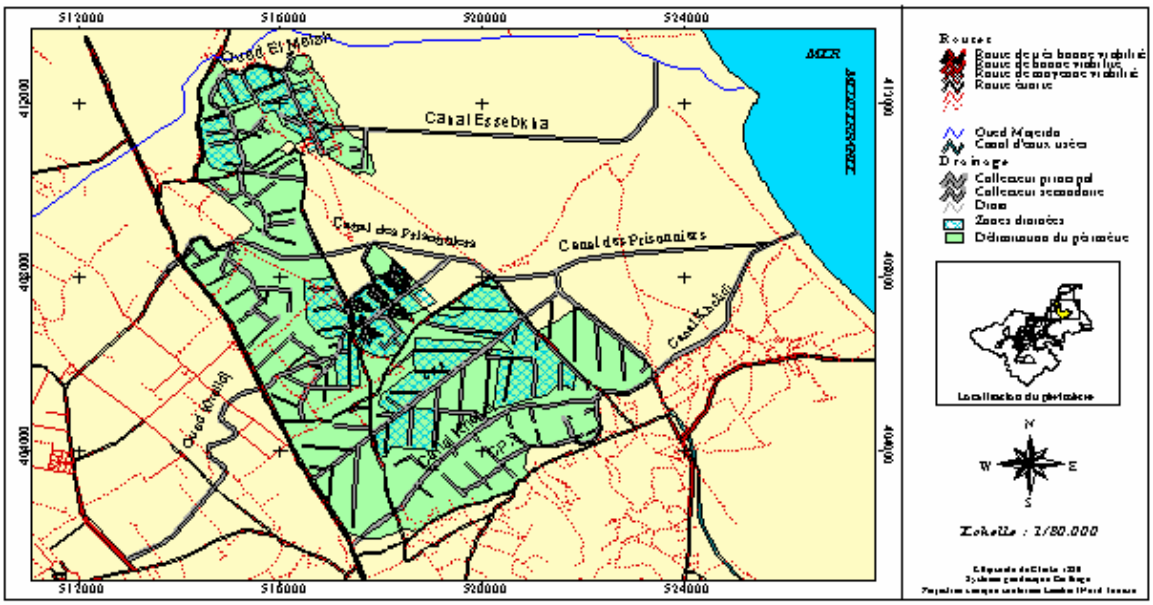


Figure 8. Réseaux de drainage du périmètre.

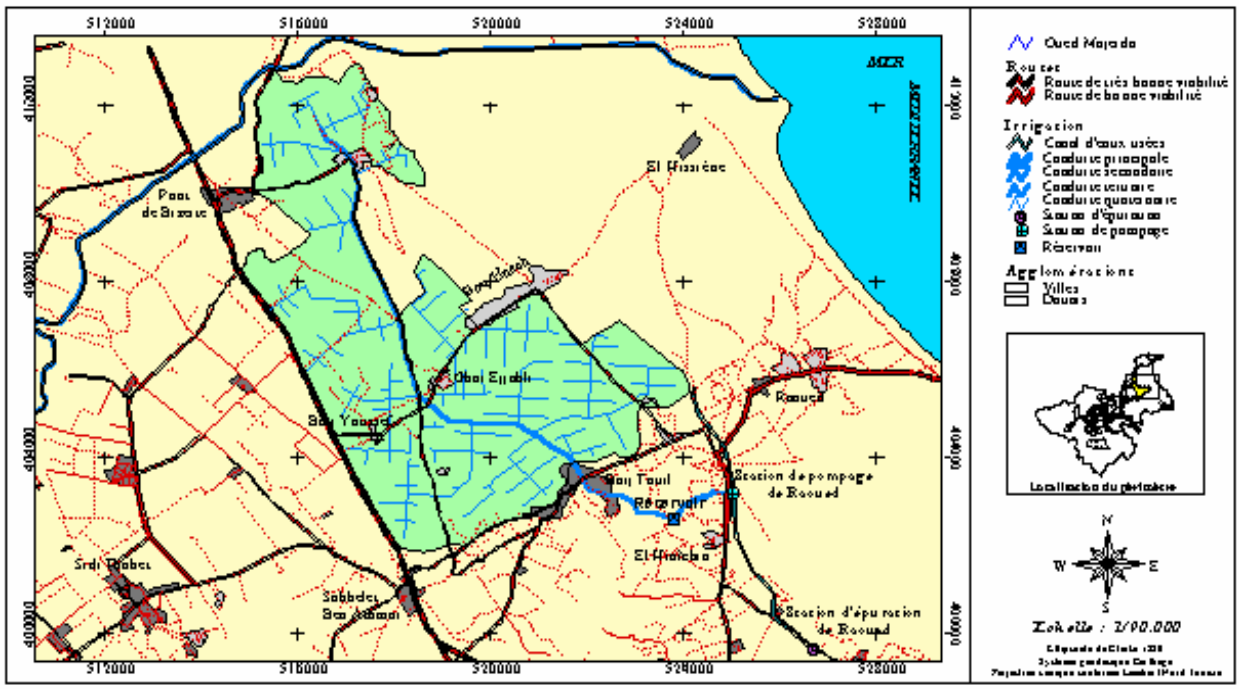


Figure 9. Réseau d'irrigation à partir de la station de pompage de Raoued.

Organisations de gestion du périmètre

Le parcellaire (figure 10) est subdivisé en sept secteurs et les secteurs en zones d'irrigation (figure 11). Les secteurs sont sous l'encadrement d'un vulgarisateur du centre de gestion du périmètre de Cébala situé à Borj-Touil (anciennement sous la dépendance du Ctv de Kalaat Landalous, il se trouve maintenant sous la dépendance directe du Crda de l'Ariana).

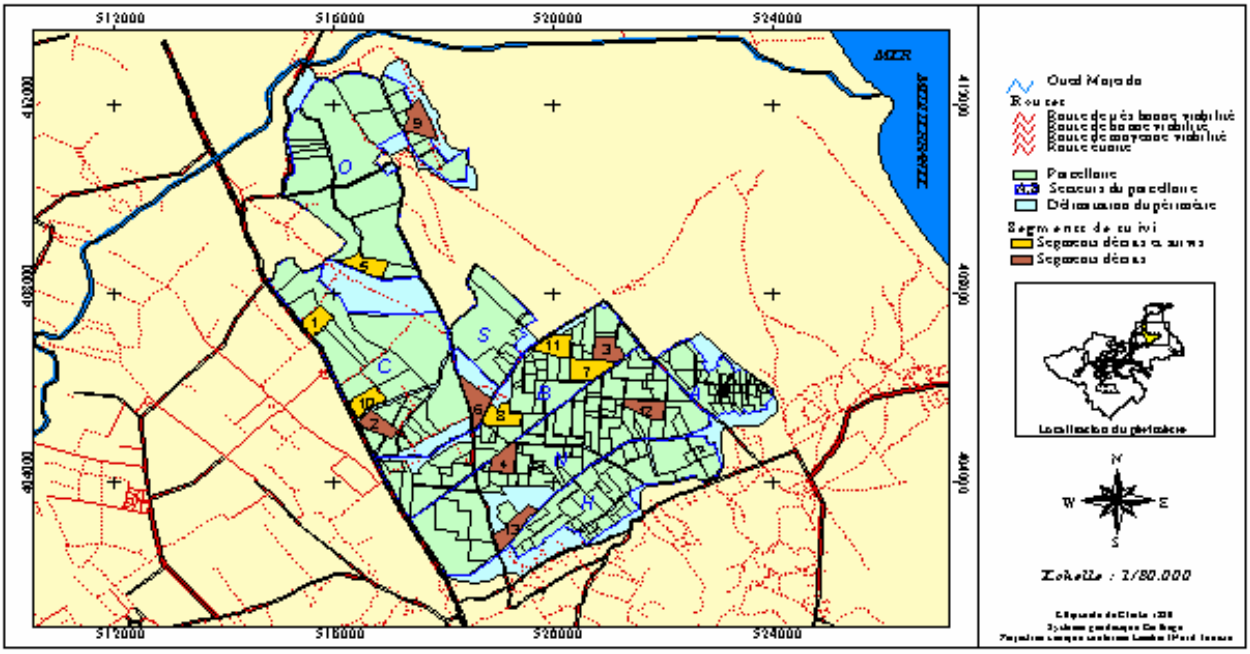


Figure 10. Parcellaire, secteurs (en lettre capitale) et segments d'enquête du Crda (numéros).

Les segments numérotés représentés sur la figure 10 sont des surfaces choisies aléatoirement par le Crda tous les deux ans pour effectuer un suivi statistique des campagnes agricoles sur la base de trois enquêtes par an. Ce sont six de ces segments qui ont été choisis pour les études de détail (exemple figure 11) : topographie fine, suivi des cultures, prospection pédologique et caractérisation rétractométrique et suivi satellitale (Niang, 2001) à l'occasion du projet.

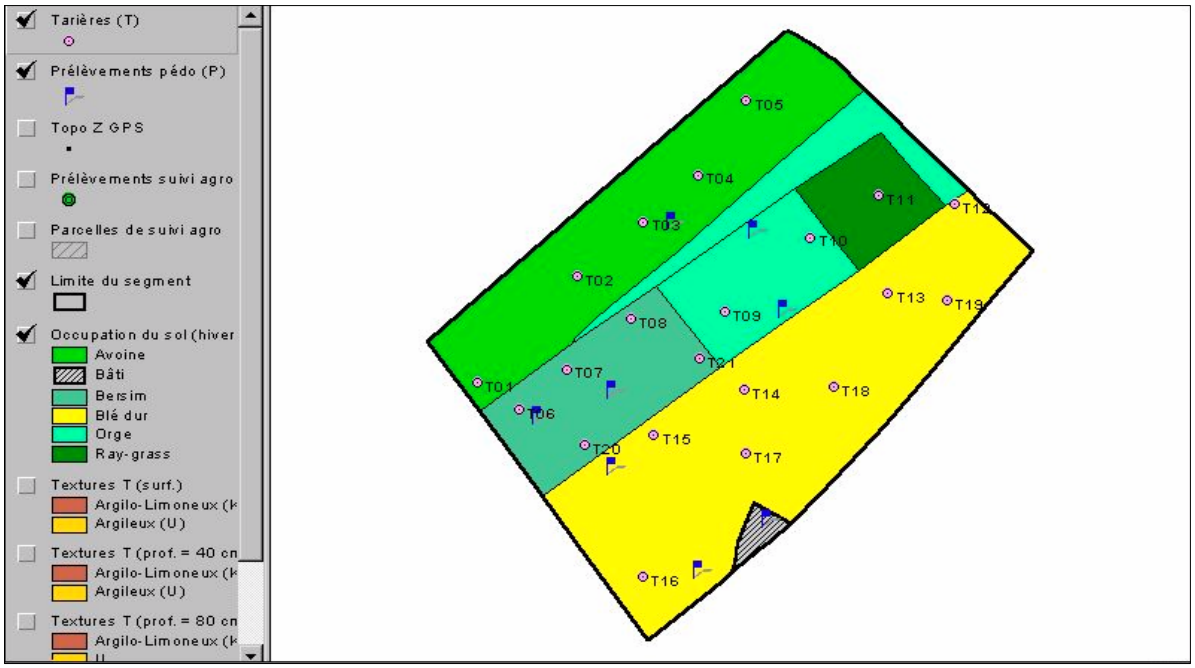


Figure 11. Segment 1301 ; toutes les observations sont à référence spatiale.

Enfin, le géoréférencement des piézomètres a été effectué (figure 12) ainsi que l'archivage des données relevées depuis 1995. Cela permet de traiter rapidement les données et de localiser très vite les zones à risque. De plus, le croisement de ces données, rendu possible par le Sirs, avec les informations sur la consommation d'eau aux bornes, les unités agronomiques associées etc., permettra d'en étudier et comprendre l'évolution.

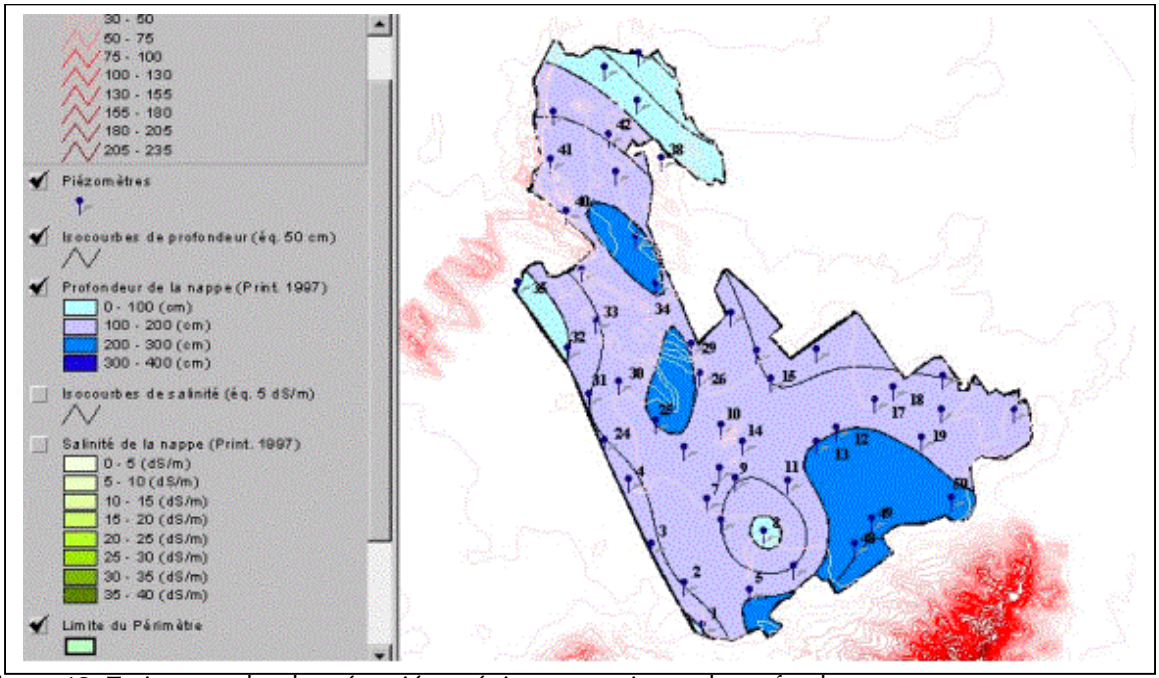


Figure 12. Traitement des données piézométriques par niveau de profondeur.

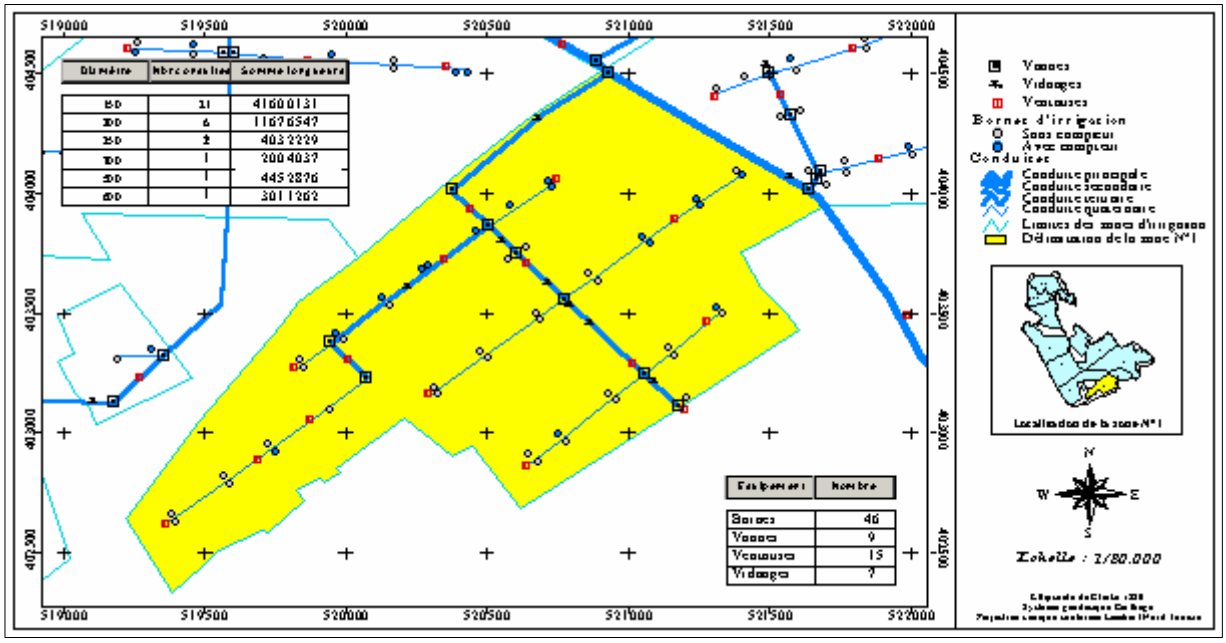


Figure 13. Exemple d'une zone hydraulique (n°1).

Chaque élément du réseau (bornes, ventouses, vannes) est spatialement référencé avec son identification, ses caractéristiques et son état de marche.

Les cartes pédologique et physiographique

Les cartes pédologiques et physiographiques dont des extraits sont donnés aux figures 14 et 15, sont des sorties graphiques (*lay-out* de projets Arc View) issues du Sirs-Sols du périmètre de Cébala. Les deux extraits représentent la même portion de la carte. On peut constater que les unités sont emboîtées ; les chiffres dans les unités de modelé réfèrent au matériau (nature, mise en place) et les lettres dans les unités de sol indiquent la classe texturale.

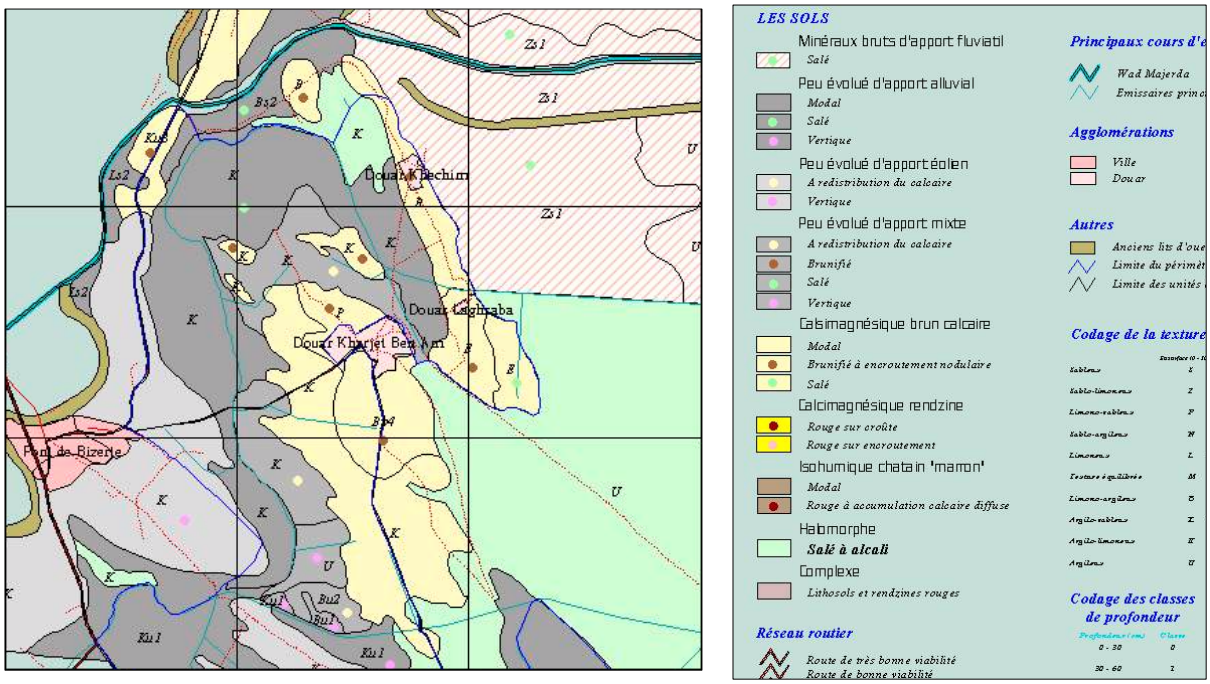


Figure 14. Extrait réduit d'une partie de la carte pédologique dressée au 1/20 000 et de sa légende.

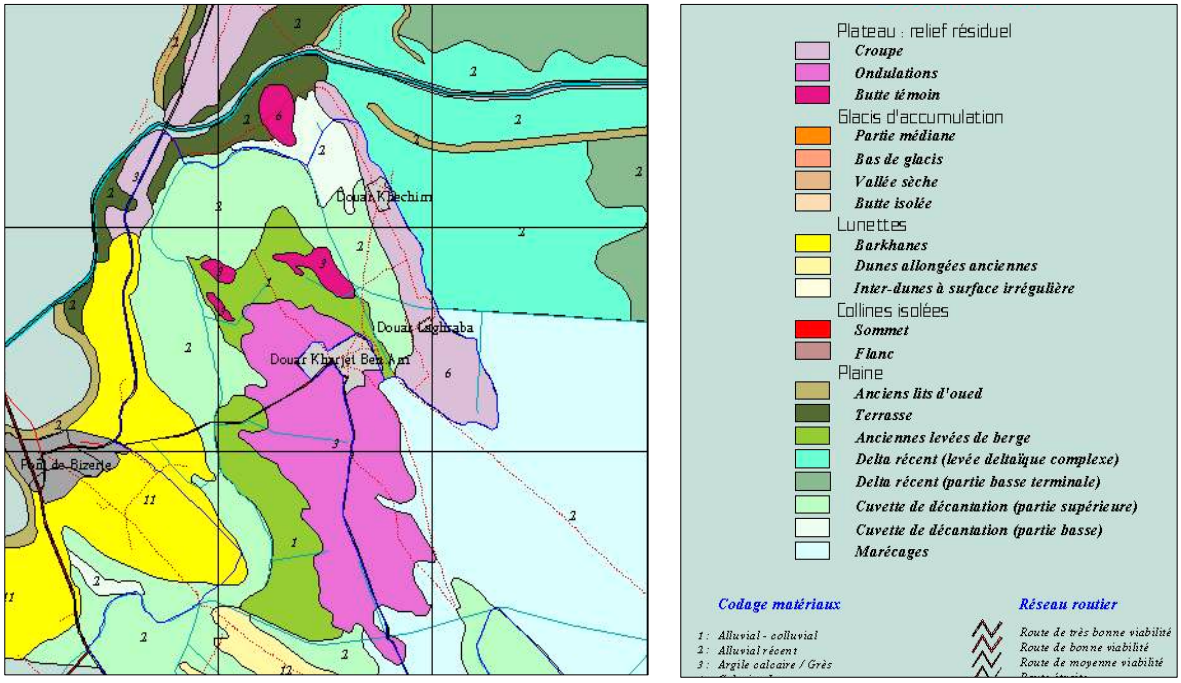


Figure 15. Extrait de la carte physiographique du périmètre irrigué de Cébala dressée au 1/20000.

Caractérisation pédohydrique des sols peu évolués d'apport

On ne peut donner ici qu'un exemple des résultats obtenus qui sont détaillés dans le n° spécial du Bulletin des Sols (Direction des sols, Ird, 2001).

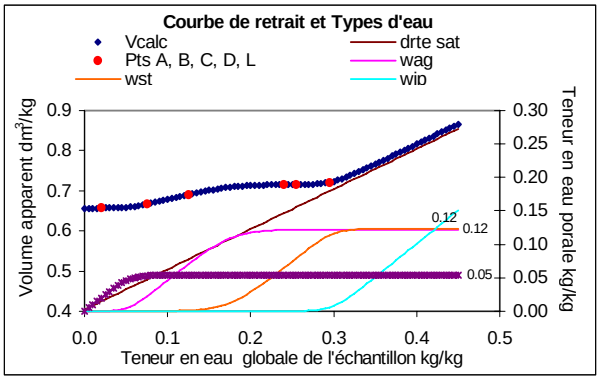
Il s'agit d'une feuille de résultat rétractométrique concernant le sol peu évolué d'apport alluvial modal, sur matériau limoneux d'ancienne levée de berge. Les paramètres pour CropSyst sont donnés en bas de la feuille (figure 16).

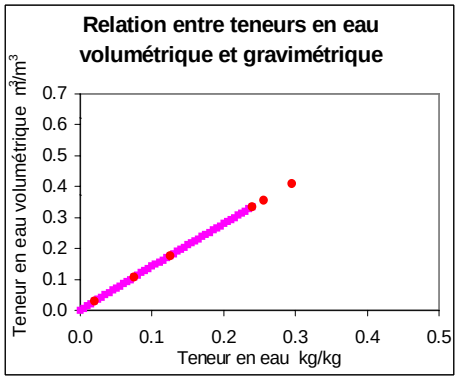
Conclusion

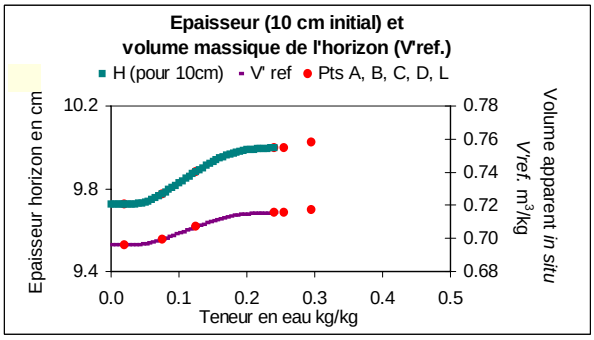
Le Sirs-Sols est un assemblage compatible de deux « sous-Sirs » bien différenciés comme appartenant chacun à un modèle isomorphe du système général : [Homme-milieu naturel] et [Homme-milieu aménagé].

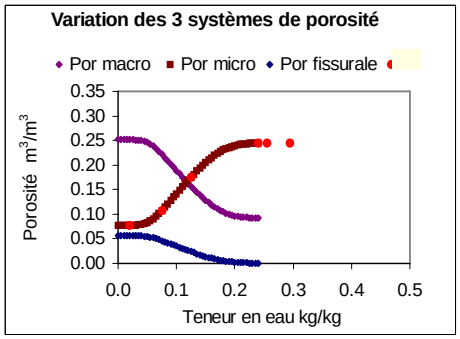
Le Sirs du milieu naturel donne des unités de sol qui, définies dans une structure emboîtée -relief, modelé, sols-, sont délimitées avec un minimum d'erreur et sont d'emblée caractérisées pédogénétiquement, selon deux des trois axes de description d'un objet dans l'approche systémique. En ce sens, la classifications pédogénétique des naturalistes est tout à fait justifiée et doit être conservée pour classer les unités de sol. Une méthodologie a été donnée ici pour effectuer ces délimitations en niveaux emboîtés à partir des anciennes cartes pédologiques dressées avec cette approche pédogénétique comme c'était le cas en Tunisie.

Ensuite, une caractérisation de ces unités sur l'axe fonctionnel est nécessaire pour pouvoir effectuer une modélisation agronomique de ces unités ; la texture est la donnée de base la plus courante dans les bases de données et actuellement la seule utilisée pour calculer les paramètres de fonctionnement hydrique du sol. On a montré cependant que la texture seule ne pouvait suffire et qu'il faut lui adjoindre des indicateurs du comportement hydrostructural du sol si l'on veut modéliser ses propriétés agronomiques de façon non empirique à partir des processus d'interaction eau-sol, aux niveaux des organisations internes du sol (agrégats, plasma). La courbe de retrait est susceptible d'être cet indicateur. Sa mesure en laboratoire, automatisée, a été standardisée au cours de ce projet et vient facilement compléter la méthodologie de réactualisation des cartes pédologiques anciennes qui a été donnée ici, pour obtenir un support d'informations pédologiques optimisé pour la modélisation agronomique du sol.



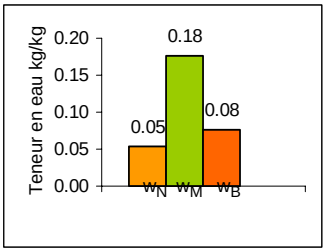



Epaisseur (10 cm initial) et volume massique de l'horizon (V'ref.)
H (pour 10cm)
V' ref
Pts A, B, C, D, L
Epaisseur horizon en cm
Volume apparent in situ V'ref. m3/kg
Teneur en eau kg/kg

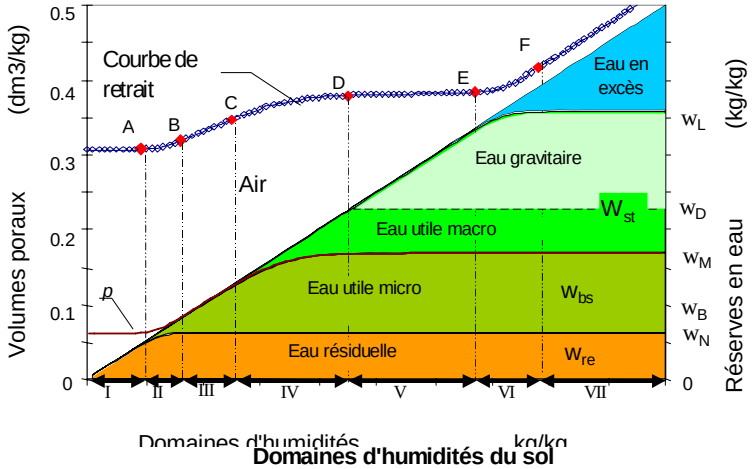


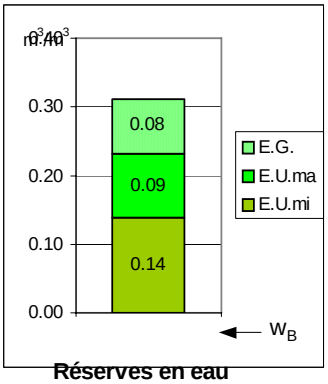
Caractéristiques des peds primaires (matériau plasmique)

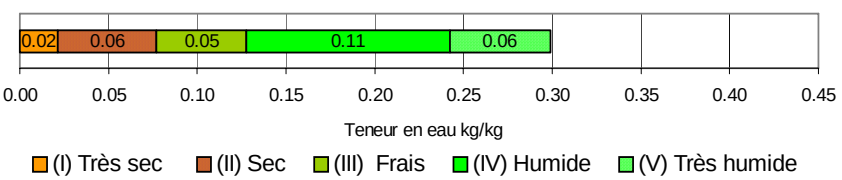
		kg/kg ou dm³/kg		m³m³
Volume microporal minimum	W_N	0.05	$\theta_N=W_N/V_{hor}$	0.08
Volume microporal maximum	W_M	0.18	θ_M	0.25
Point d'entrée d'air micro (B)	W_B	0.08	θ_B	0.11



Réserves en eau du sol







	kg/kg ou dm³/kg	m³/m³
W_A et θ_A	0.02	0.03
W_B et θ_B	0.08	0.11
W_C et θ_C	0.13	0.18
W_D et θ_D	0.24	0.34
W_L et θ_L	0.30	0.42

Paramètres du sol pour CropSyst

CC (m3/m3)	PFP(m3/m3)	dap (kg/m3)	Argile	Limon F	Limon G	Sable F	Sable G
0.34	0.11	1.40	23.60	18.4	19.4	34	1.6

Figure 16. Exemple de feuille de résultats donnée par l'analyse rétractométrique à la Dir. des Sols.

L'intérêt d'avoir une telle mise en forme pédologique dans un Sirs qui contient aussi les niveaux de gestion et de surveillance du périmètre, est que le croisement des deux « sous-Sirs », du milieu naturel et du milieu aménagé, fournit l'unité agronomique de base [sol-parcelle]. Cette unité, commune aux deux Sirs (par ailleurs bien différenciés par application du système général), est l'unité de base à considérer dans les simulations agro-économiques envisagées à des niveaux d'échelle de gestion plus haut : le périmètre, la zone hydro-agricole etc. L'intégration d'un niveau à un autre se faisant grâce aux données cartographiques du Sirs éventuellement complétées par l'imagerie satellitale.

Le Sirs-Sols de Cébala bâti dans ce sens, a donc deux utilisations possibles :
– comme outil d'aide à la gestion, au contrôle et à la surveillance du périmètre : élaboration des rapports de situation, organisation des campagnes d'enquête, de vulgarisation etc. ;
– comme outil d'aide à la décision qui, s'associant à l'imagerie satellitale, permet une simulation optimale de la production agronomique du système, de son évolution etc. à plusieurs de ses niveaux de gestion.

Bibliographie

BELHOUCHETTE H., M. DONATELLI, E. BRAUDEAU, J. WERY, 2001. Test of a cropping systems model "CropSyst" in tunisian conditions. Poster session in 2nd international symposium "Modelling Cropping Systems" juillet 2001. Florence, Italie.

BARRUÉ-PASTOR M., MUXART T. 1992. Le géosystème : nature « naturelle » ou nature « anthropisée ». In Sciences de la nature Sciences de la société. Les passeurs de frontière. Ed. Marcel Jolivet. Paris, France, Cnrs Editions, p. 259-266.

BOUMA J., STOORVOGELET J., VAN ALPHEN B.J., BOOTLINK H.W.G. 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. Soil Science Society of America Journal, 63 : 1763-1768.

BRABANT P. 1992. Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes de sols dans les Sig ? Cahier Orstom, série Pédologie, 27 : 298-315.

BRAUDEAU E., DONATELLI M. 2001. Parameters estimation of the soil characteristic shrinkage curve. Poster session in 2nd international symposium "Modelling Cropping Systems", juillet 2001. Florence, Italie.

BRAUDEAU E. 1988a. Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structurés Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, 307 (15) : 1731-1734.

BRAUDEAU E. 1988b. Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol base sur l'étude de la courbe de retrait Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2, 307 (18) : 1933-1936.

BRAUDEAU E. 1988c. Méthode de caractérisation pédohydrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait Cahiers Orstom.Série Pédologie, 24 (3) : 179-189.

BRAUDEAU E., 1995. Caractérisation des propriétés hydrostructurales des sols. Tunis, Tunisie, Direction des Sols, Etudes Spéciales n° 283.

BRAUDEAU E., COSTANTINI J.M., BELLIER G. AND COLLEUILLE H. 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. Soil Science Society of America Journal 63 : 525-535.

BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUGET F., NICOULLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD J.M., DELECOLLE R., 1998. STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie, 18 : 311-316.

CPCS,1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et de Classification des Sols. Laboratoire de Géologie-Pédologie, Rapport. Paris, France, Ensa, 87 p.

DIRECTION DES SOLS-IRD, 2001. Un système d'information pédologique, le Sirs-Sols du périmètre irrigué de Cébala dans la Basse Vallée de la Mejerda. Bulletin des Sols, Numéro spécial. Tunis, Tunisie, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture.

LEMOIGNE J.L., 1994. Le Système Général ou théorie de la modélisation. Paris, France, Presses Universitaires de France.

MCKENZIE N.J., JACQUIER D.J. AND RINGROSE-VOAD A.J. 1994. A rapid method for estimating soil shrinkage. Australian Journal of Soil research. 32 : 931-938.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE DE TUNISIE, 1965. Légende des cartes pédologiques et d'aptitude des sols aux cultures en sec et en irrigué utilisée en Tunisie. Tunis, Tunisie, Service Pédologique de la Direction HER du Ministère de l'agriculture.

MORI A., 1963, 1964. Cartes pédologiques au 1/25 000 de la Basse vallée de la Mejerda. Tunis, Tunisie, Direction des Sols.

MUXART T., BLANDIN P, FRIEDBERG C. 1992. Hétérogénéité du temps et de l'espace: niveaux d'organisation et échelles spatio-temporelles. In Sciences de la nature Sciences de la société. Les passeurs de frontière. Ed. Marcel Jolivet. Paris, France, Cnrs Editions, p. 403-425.

STOCKLE C.O., DONATELLI M., 1997. The CropSyst Model: A brief description. In: Plentinger, M.C. & F.W.T. Penning de Vries (Ed.). Rotation models for ecological farming. CAMASE/PE workshop report. Quantitative Approaches in Systems Analysis No. X. AB-DLO, Wageningen, The Netherlands p. 35-43.

TIETJE O. AND M. TAPKENHINRICHS, 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. Soil Science Society of America journal, 57: 1088-1095.

ZIDI C. ET BRAUDEAU E. 1998. Le rétractomètre ; mode d'emploi et utilisation pour la caractérisation hydro-structurale des sols. Tunis, Tunisie, Direction des Sols, Etudes Spéciales n° 303.

Annexe

Appareillage de mesure de la courbe de retrait en continu, rétractométrie

L'appareillage et le protocole de mesure ont été décrits dans le numéro 303 de « Etudes spéciales » de la Direction des sols (Zidi et Braudeau, 1998). Les échantillons analysés standards sont des cylindres de sol reconstitués à partir de la terre fine (terre désagrégée doucement et tamisée à 2 mm).

Les cylindres de sol remaniés sont fabriqués très simplement à partir des échantillons de sol préalablement séchés et tamisés à 2 mm à la manière classique par le laboratoire des sols. C'est en effet le même échantillon tamisé à 2 mm qui sert pour les autres analyses physico-chimiques prévues pour ces sols (granulométrie, pH, CE, calcaire actif et total). Il est mis à humecter sur un bac à sable, sans le cylindre en PVC, pendant au moins 24 heures avant d'être placé dans le rétractomètre (figure 17) selon la procédure habituelle (E.S. 303). Toutes les minutes le plateau tournant dépose l'un des huit échantillons sur la balance et en même temps sous un rayon laser vertical (mesure de la hauteur) et un faisceau laser horizontal (mesure du diamètre).

Les courbes de retrait, $V = f(W)$, sont calculées et analysées par le logiciel « Carhys » qui détermine les paramètres pédohydriques, c'est-à-dire les coordonnées des points caractéristiques de la courbe de retrait qui sont les points de transition de phases de retrait (figure 17) A, B, D, D, E, F, appelés paramètres pédohydriques.

Travailler sur des échantillons de sol remaniés a plusieurs avantages dont le premier est d'obtenir toujours la même forme de courbe standard (figure 18) avec ses 7 phases de retrait. Cela s'explique par le fait que l'échantillon de sol remanié est un assemblage reconstitué d'agrégats inférieurs à 2 mm (terre fine) ; il correspond le mieux à la représentation du sol en assemblage d'agrégats primaires qui est à la base de notre modélisation (figure 19). On accède ainsi à une méthode qui, fournissant toujours le même jeu de paramètres, peut être considérée comme standard.

Figure 17. Unité de mesure de la courbe de retrait en continu (Direction des sols).

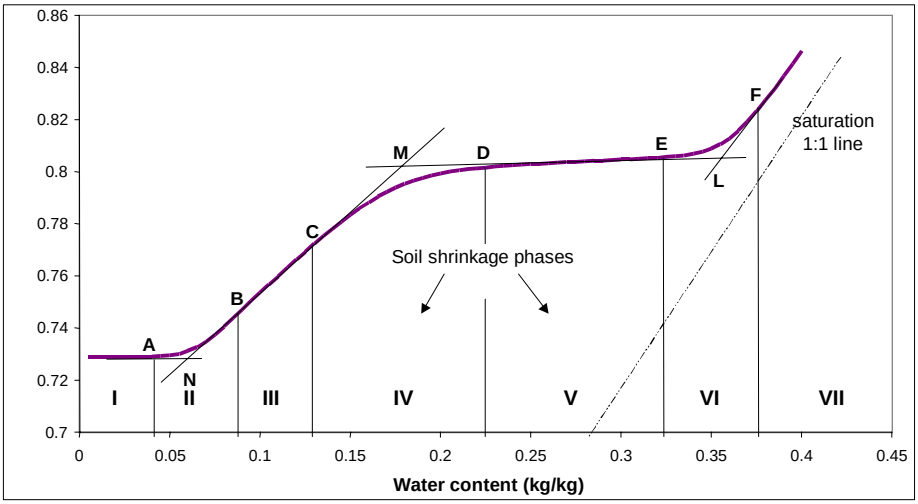


Figure 18. Courbe de retrait standard d'un échantillon de sol remanié. Les points A, B, C, D, E, F sont les points de transition des phases de retrait.

Les concepts de base pour l'interprétation de la courbe de retrait (Cr)

Le concept fondamental qui nous permet d'exploiter la Cr pour la caractérisation du fonctionnement interne de la structure d'un horizon de sol, est le concept de point d'entrée d'air dans le plasma argileux de l'organisation du sol (Braudeau, 1988 ; Braudeau et Bruand, 1993) : Ce point appelé point d'entrée d'air micro, est le point B de la courbe de retrait (figure 18), point de transition entre la phase de retrait normal et la phase de retrait résiduel, indiquant précisément le début de l'entrée de l'air dans le plasma argileux constituant les agrégats primaires (Braudeau et Bruand, 1993). Il est facilement déterminé sur les courbes de retrait mesurées en continu. C'est dire que la rétractométrie, mesure du retrait en continu, constitue de fait la seule méthode de mesure appropriée du point d'entrée d'air dans le plasma argileux sans avoir à détruire l'échantillon de sol (Braudeau et Bruand, 1993). L'identification de ce point spécifique particulier permet de différencier précisément le volume poral du plasma argileux du volume poral inter-agrégat et de les modéliser quantitativement en fonction de la teneur en eau. On peut dès lors poser le modèle fonctionnel de base de l'organisation interne du sol suivant.

La pédostructure

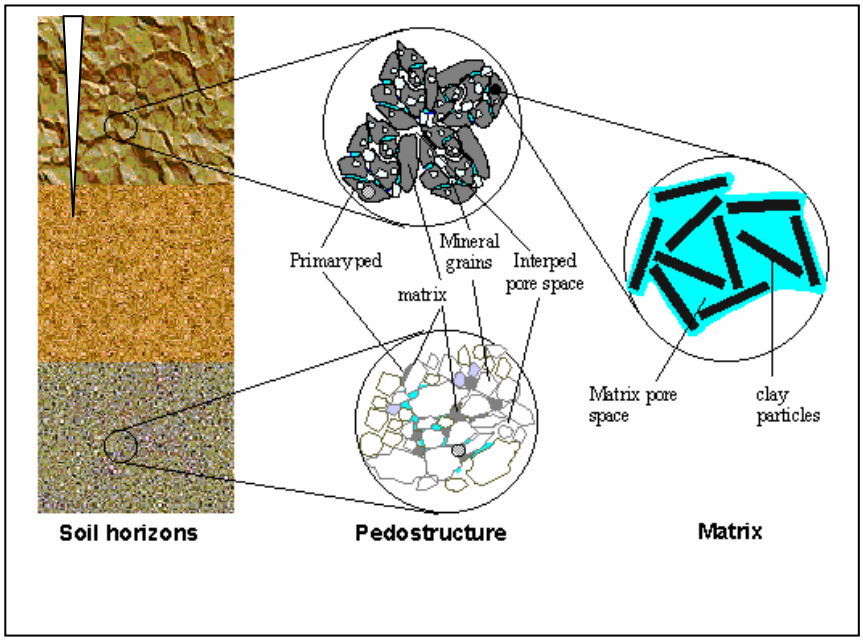


Figure 19. La pédostructure, modèle de l'horizon de sol en agrégats.

L'horizon de sol est organisé en mottes ou peds qui sont eux-mêmes formés de peds plus petits etc. jusqu'aux agrégats primaires et/ou sables du squelette. La « pédostructure » est l'assemblage des agrégats d'un horizon de sol, sans les fissures ou fentes de retrait qui apparaissent à la dessiccation. Les micromorphologues l'appellent fond matriciel, ou *fabric*. La courbe de retrait mesurée ici sur les cylindres de sol remanié représente le retrait volumique de la pédostructure en fonction de la teneur en eau. On considère donc deux systèmes de porosité bien définis et complémentaires, repérés grâce au point d'entrée d'air dans la microporosité (point B, figure 18) :

– le volume microporal Vp^{μ} et

– le volume macroporal Vp^{m} .